多维地震作用下高层结构振动混合控制研究

汪权[1,2],周超杰[1],孙旭[1],林欣蓉[1],王肖东[3]

(1.合肥工业大学土木与水利工程学院,230009 合肥;2.土木工程防灾减灾安徽省工程技术研究中心,230009 合肥;3.四川省建筑设计研究院,610000 成都)

摘　要:针对水平和竖向地震作用下高层建筑结构的混合振动控制问题,研究调谐质量阻尼器(tuned mass damper,TMD)体系、隔震结构体系、隔震与TMD混合控制体系3种策略对水平与竖向地震共同作用下结构振动响应的减振效果。选取典型的20层钢结构Benchmark结构模型,利用ANSYS软件建立带有TMD和隔震层结构的有限元模型,比较了结构在水平地震单独作用下与水平和竖向地震共同作用下的振动响应。结果表明,水平方向上的振动响应无明显变化;竖直方向上,有控状态下的减振指标相对于无控状态出现了增大现象,尤其是层间隔震结构增大较为明显。研究成果可为高烈度区高层隔震结构设计提供参考。

关键词:振动控制;调谐质量阻尼器;隔震;混合控制

中图分类号:TU973.31　　**文献标志码:**A

Hybrid control of high-rise buildings' vibration in multi-dimensional earthquakes

WANG Quan[1,2],ZHOU Chaojie[1],SUN Xu[1],LIN Xinrong[1],WANG Xiaodong[3]

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering,Hefei University of Technology,230009 Hefei,China;
2.Anhui Civil Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation,230009 Hefei,China;
3.Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute,610000 Chengdu,China)

Abstract: In view of hybrid vibration control of high-rise building structures in horizontal and vertical earthquake actions,the vibration reduction effects of tuned mass damper (TMD) system,isolated structure system and hybrid control system of both on structural vibration response in horizontal and vertical earthquake action are studied. A typical 20-story steel structure model is chosen while the finite element model of the structure with TMD and isolation layer is established with the use of ANSYS software. The vibration responses of the structure in horizontal earthquake actions and horizontal plus vertical earthquake actions are thereafter compared. The results show that there is no obvious change in the horizontal vibration response,while vertically the vibration reduction index in the controlled state increases compared with that in the uncontrolled state,particularly in the story isolation structure. The research results can provide reference for the design of high-rise isolated structures in high intensity earthquake zones.

Key words: vibration control; tuned mass damper; vibration isolation; hybrid control

收稿日期:2020-11-19　　**修回日期:**2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51408178);合肥工业大学2020年省级大学生创新创业训练计划项目(No.S202010359095)

通信作者:汪权,副教授。E-mail:wqhfut@163.com

引用格式:汪权,周超杰,孙旭,等.多维地震作用下高层结构振动混合控制研究[J].应用力学学报,2022,39(4):742-747.

WANG Quan, ZHOU Chaojie, SUN Xu, et al. Hybrid control of high-rise buildings' vibration in multi-dimensional earthquakes[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(4):742-747.

地震运动多呈现为水平和竖向的多向复杂震动。一般来讲,高层建筑物的竖向承载能力比较大,建筑物的损害一般由水平振动所引起。然而近几十年的地震灾害记录表明,在震中地区或者高烈度区域,相比于水平震动,地震竖向加速度分量对建筑物破坏作用是很明显的,甚至出现了竖向加速度峰值与水平加速度峰值之比大于 1 的现象[1]。

隔震建筑中设置的隔震层,把上部结构和下部结构分隔开来,以此来消耗地震能量,避免或减少地震能量向上传输。建筑隔震技术起源于日本河合浩藏提出的结构基础隔震概念(1881 年)。日本东京的帝国饭店[2]是历史上第一幢根据隔震思想设计建造的建筑物(1921 年)。新西兰学者开发了铅芯叠层橡胶支座,建成了世界上首座铅芯橡胶支座隔震建筑[3](1981 年)。经过百余年的发展,建筑隔震技术发展成熟,取得了较多的研究成果。周福霖等[4]研究了隔震层位置变化时其相应的减震工作机理,进一步揭示了隔震的机理和隔震与 TMD 阻尼器的联系。杨参天等[5]针对 4 个高层隔震建筑,评估了地震动强度指标与结构体系、高度、隔震方案、屈重比和地震动类型参数的相关性。袁胜利[6]关注了地震动中的长周期成分对高层结构和隔震结构的影响。

调谐质量阻尼器(TMD)由质量块、弹簧和阻尼系统组成,将其振动频率调整到主体结构频率附近,改变结构共振特性,以达到减震作用。采用在结构顶层布置单个或者多个 TMD[7-8]来降低结构动态响应是目前的主要方式。汪志昊等[9]研究了 TMD 阻尼器质量块与板式电涡流阻尼器二者之间的磁场引力作用对 TMD 振动频率的影响程度,以及磁路布置对 PECD 等效阻尼系数的影响规律。TMD 的参数确定直接影响高层结构动态响应控制效果[10]。汪权等[11]提出了高层结构分布式多重调谐质量阻尼器控制策略,分别与仅在结构顶层安置单个和多个 TMD 的控制策略进行比对。

从国内外的研究和工程实际应用中可以看出,TMD 和隔震结构发展较为成熟,在水平减振隔震方面具有良好的效果;但是,对于竖向地震作用、水平地震与竖向地震作用下,其减振隔震效果如何,国内外学者对这方面的研究较少[12-14]。

本研究对于高层结构振动控制,利用 ANSYS 软件分别建立高层结构的两种单一控制(带隔震层或带 TMD)以及二者相结合的混合振动控制体系的有限元模型,分析结构在不同策略下水平地震与竖向地震共同作用下的减振效果。

1 三种控制体系有限元模型

本研究选用国际结构振动控制公共平台第 3 阶段 20 层的 Benchmark 结构模型[15]。该模型的结构布置、层高、楼层质量和刚度、结构总质量参数详见文献[15]。

文献[15]选取整个 Benchmark 模型结构短方向(南北向)的一榀框架进行分析,框架构件采用具有拉压和弯曲性能的平面弹塑性单轴单元(beam 23)。beam 23 单元弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,切线模量为 2.06×10^{9} Pa,梁、柱单元屈服强度分别为 248 MPa 和 345 MPa,实常数截面为通用截面。

1.1 Case 1:带 TMD 控制体系有限元模型

为了抑制水平地震作用下的结构振动响应,将结构顶层 TMD 的刚度、阻尼沿水平方向布置。

主结构固有角频率 $\Omega_n=\sqrt{K/M}$。附属 TMD 质量比 $\mu=m/M$、固有角频率 $\omega=\sqrt{k/m}$、阻尼比 $\zeta=c/(2\sqrt{km})$。其中 M、K 分别为主结构系统的质量和刚度,m、k、c 分别为附属子 TMD 的质量、弹簧刚度和阻尼。

TMD 的质量块采用质量单元(mass 21)模拟,质量比 μ 取 0.05[11],故质量参数为 2.90×10^{5} kg。TMD 阻尼器的弹簧部分采用弹簧单元(combin 14)模拟,阻尼比 ζ 取 0.05[11],依据模型的一阶弯曲模态设计,故单元阻尼系数 c 和弹簧刚度 K_3 分别取 4.75×10^{4} N/(m/s)、7.8×10^{5} N/m。主结构固有角频率 $\Omega_n=1.63$ rad/s,TMD 调谐频率 $\omega=1.55$ rad/s,最佳调谐比 $\gamma=0.95$。

1.2 Case 2:带隔震层控制体系有限元模型

本研究算例 20 层 Benchmark 模型结构有 2 层地下结构。如果将隔震层设置在基础层,则需要在地下结构周围加设挡土墙,仍然采用基础隔震就显得不经济了,从经济性和隔震效果综合考虑将隔震层设置在 1 层柱顶。隔震支座采用简化双线性恢复力模型,支座的水平和竖直方向分别选择 Combin 40 单元和 Combin 14 单元。

Combin 40 单元用于模拟隔震支座的屈服前刚度(K_u)、屈服后刚度(K_d)、屈服力(Q_d)、阻尼比

(ξ);Combin 14 单元用于模拟隔震支座的竖向刚度(K_{V1})和竖向阻尼系数(C_{V1})。

Combin 40 单元的实常数为刚度(K_{H1}和 K_{H2})、阻尼系数(C_H)、质量(M_1)、间隙大小(d_{gap})、界限滑移力(F_{slide})。由 Combin 40 单元的力学性质可知:$K_{H1}=K_u-K_d$,$K_{H2}=K_d$,$d_{gap}=0$,$F_{slide}=0$,C_H可由隔震支座的阻尼比计算求得。根据本模型的结构参数及地震激励,Combin 40 单元赋值的实常数分别为 $K_{H1}=3\times10^6$ N/m,$C_H=0.272$,$M_1=0$,$d_{gap}=0$,$F_{slide}=1\times10^7$ N,$K_{H2}=1\times10^6$ N/m。

Combin 14 单元的实常数为刚度(K_{V1})、阻尼系数(C_{V1})、初始长度(L_{in})、初始力(F_{in})。根据本模型的结构参数及地震激励,Combin 14 单元赋值的实常数分别为:$K_{V1}=3.45\times10^9$ N/m,$C_{V1}=0.272$。

1.3 Case 3:混合控制体系有限元模型

将隔震与 TMD 相结合的混合振动控制体系模型,其隔震层与 TMD 的单元选取类型及参数设置同上述两种策略。限于篇幅,本研究仅给出了 Case 3 的有限元模型,如图 1 所示。

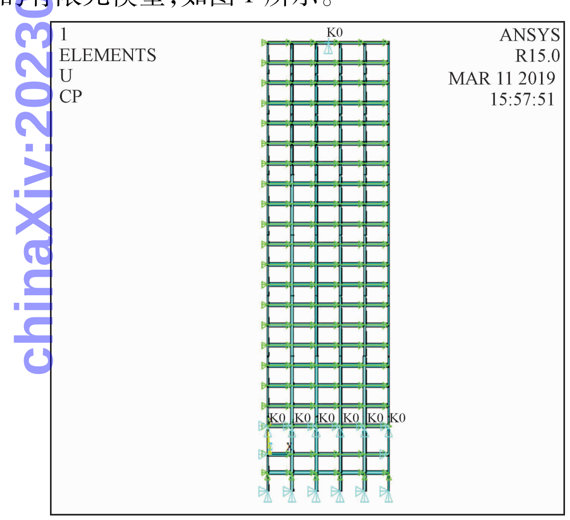


图 1 TMD 与隔震混合振动控制体系有限元模型

Fig. 1 FEM vibration control model with TMD and isolation

通过模态分析验证了有限元模型的准确性,固有频率对比结果如表 1 所示。

表 1 固有频率对比(单位:Hz)

Tab. 1 Comparison of natural frequencies (unit:Hz)

阶次	文献[15]	原结构	Case 1	Case 2	Case 3
1	0.26	0.26	0.21	0.22	0.19
2	0.75	0.76	0.30	0.64	0.25
3	1.30	1.30	0.76	1.16	0.65
4	1.83	1.83	1.30	1.67	1.16
5	2.40	2.41	1.84	2.22	1.67

2 水平与竖向地震作用下的结构振动混合控制

2.1 竖向地震波选取

结合模型实际情况,选择 Elcentro 波、Taft 波和天津波 3 种实际地震波进行水平和竖向动力时程分析,其水平向加速度时程曲线多见于各类文献,限于篇幅,图 2 仅给出其竖向加速度时程曲线。本研究旨在研究水平地震和竖向地震共同作用下的减振效果,故未对地震波进行调幅处理。

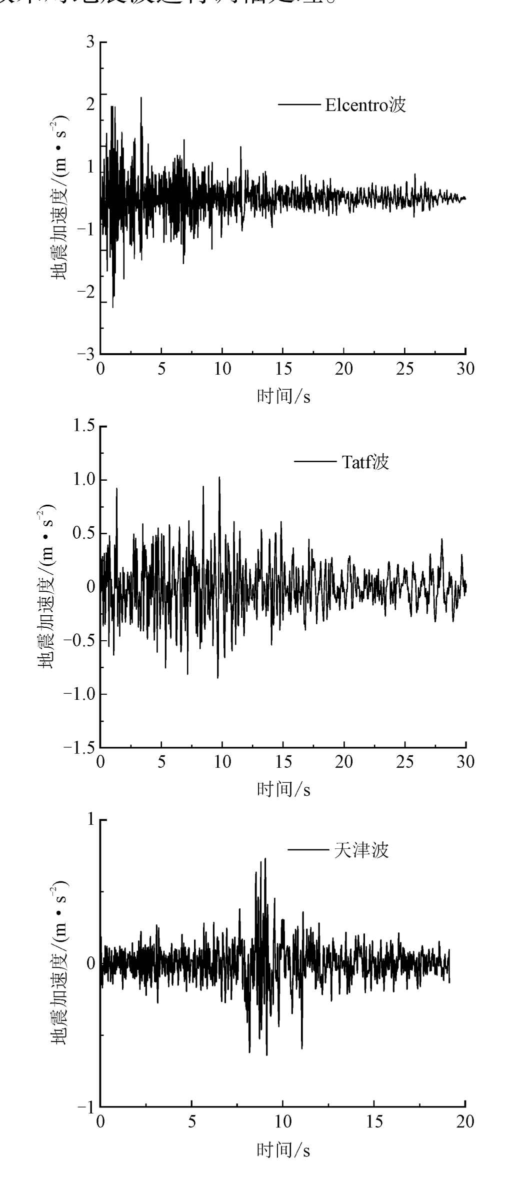


图 2 Elcentro、Taft 及天津波竖向加速度曲线图

Fig. 2 Vertical acceleration curves of Elcentro, Taft and Tianjin waves

2.2 水平与竖向地震共同作用下结构水平向响应

本研究选取结构的最大水平位移、最大水平加速度和底层最大剪力 3 个水平向响应作为指标，比较结构在水平与竖向地震共同作用下和水平地震单独作用下的结构减振效果。

为了评价水平地震与竖向地震共同作用时对水平响应减振的影响，引入 L_1、L_2 和 L_3，定义如下。

$$L_1=\left\{\frac{\max|X_i^{\mathrm{H}}(t)-X_i^{\mathrm{H+V}}(t)|}{\max|X_i^{H}(t)|}\right\}, i=1,\cdots,n,$$

$$L_2=\left\{\frac{\max|\ddot{X}_i^{\mathrm{H}}(t)-\ddot{X}_i^{\mathrm{H+V}}(t)|}{\max|\ddot{X}_i^{H}(t)|}\right\}, i=1,\cdots,n,$$

$$L_3=\left\{\frac{\max|F^{\mathrm{H}}(t)-F^{\mathrm{H+V}}(t)|}{\max|F^{H}(t)|}\right\}$$

式中：$X_i^{\mathrm{H}}(t)$、$X_i^{\mathrm{H+V}}(t)$、$\ddot{X}_i^{\mathrm{H}}(t)$、$\ddot{X}_i^{\mathrm{H+V}}(t)$ 分别为 H 单独作用和 H + V 共同作用下，结构第 i 层的水平位移和水平加速度；$F^{\mathrm{H}}(t)$、$F^{\mathrm{H+V}}(t)$ 分别为 H 单独作用和 H + V 共同作用下的底层剪力。

H 单独作用下和 H + V 共同作用下的结构水平向响应评价指标如表 2 所示。从表 2 可以看出，无控、TMD 控制、隔震及混合控制 H + V 共同作用下结构水平向响应与 H 单独作用下的 3 个指标均小于 5%，即竖向地震对结构水平向位移、加速度和底部剪力影响不大。

表 2　3 种控制方案水平向结构响应评价指标

Tab. 2　Three evaluation indexes on horizontal response

工况	指标	Elcentro 波	Taft 波	天津波
无控	L_1/%	0.09	0.43	0.00
	L_2/%	1.75	0.15	0.17
	L_3/%	0.13	0.03	0.36
TMD	L_1/%	0.03	0.17	0.00
	L_2/%	1.33	2.72	0.21
	L_3/%	0.35	2.14	0.06
隔震	L_1/%	0.00	0.00	0.00
	L_2/%	2.85	0.00	0.04
	L_3/%	4.63	3.39	3.03
混合控制	L_1/%	0.03	0.00	0.00
	L_2/%	0.08	0.30	0.00
	L_3/%	2.67	2.33	1.70

2.3 水平与竖向地震共同作用下结构竖向响应

本研究选取结构的竖向位移、竖向加速度和底层最大轴力 3 个竖向响应作为指标。为了评价水平地震与竖向地震共同作用时对竖向响应的减振影响，引入 R_1、R_2 和 R_3 这 3 个评价指标，定义如下。

$$R_1=\max\left\{\frac{\max|X_i(t)|}{X_i^{\max}}\right\}, i=1,\cdots,n,$$

$$R_2=\max\left\{\frac{\max|\ddot{X}_i(t)|}{\ddot{X}_i^{\max}}\right\}, i=1,\cdots,n,$$

$$R_3=\max\left\{\frac{|F_s(t)|}{|F_s^{\max}|}\right\}$$

式中：$|X_i(t)|$、$|X_i(t)|$ 分别为有控状态下第 $X_j^{\max}$ 层的竖向位移和加速度绝对值；$X_i^{\max}$、$\ddot{X}_i^{\max}$ 为无控状态下结构第 $X_j^{\max}$ 层的最大竖向位移和加速度；$|F_s(t)|$、$|F_s^{\max}|$ 为有控状态和无控状态下底层轴力绝对值。3 个评价指标值如表 3 所示。

表 3　3 种控制方案竖向结构响应评价指标

Tab. 3　Three evaluation indexes on vertical response

工况	指标	Elcentro 波	Taft 波	天津波
TMD	R_1/%	108.80	78.58	89.98
	R_2/%	114.34	141.96	161.73
	R_3/%	93.82	90.40	81.78
隔震	R_1/%	65.60	99.86	84.07
	R_2/%	126.97	179.91	168.61
	R_3/%	2.12	0.74	1.39
混合控制	R_1/%	60.27	93.25	67.54
	R_2/%	139.19	188.57	169.10
	R_3/%	2.12	0.73	1.41

表 3 显示，R_2（加速度）指标在 TMD、隔震、混合控制 3 种工况下均出现增大的情况，甚至会达到无控状态时的近 2 倍。Elcentro 波作用下，TMD 阻尼器的最大竖向位移出现了增大的情况，其余评价指标均小于 1。控制效果并不理想。Elcentro 波、Taft 波、天津波作用下的最大竖向位移和加速度如图3 ~ 图 4 所示。

图 3 显示，3 种地震波作用下的最大竖向位移在结构底层均较小，随着楼层高度增加先变大后减小，顶层时降到最小；TMD 控制时要优于无控，混合控制要优于隔震。

图 4 显示，3 种地震波作用下，结构各楼层最大竖向加速度随楼层高度增加而增加；底层在隔震、混合控制时比无控和 TMD 控制要小；随楼层高度增

加，隔震和混合控制增加的幅度较大；顶层在TMD、隔震和混合控制下均大幅增大。

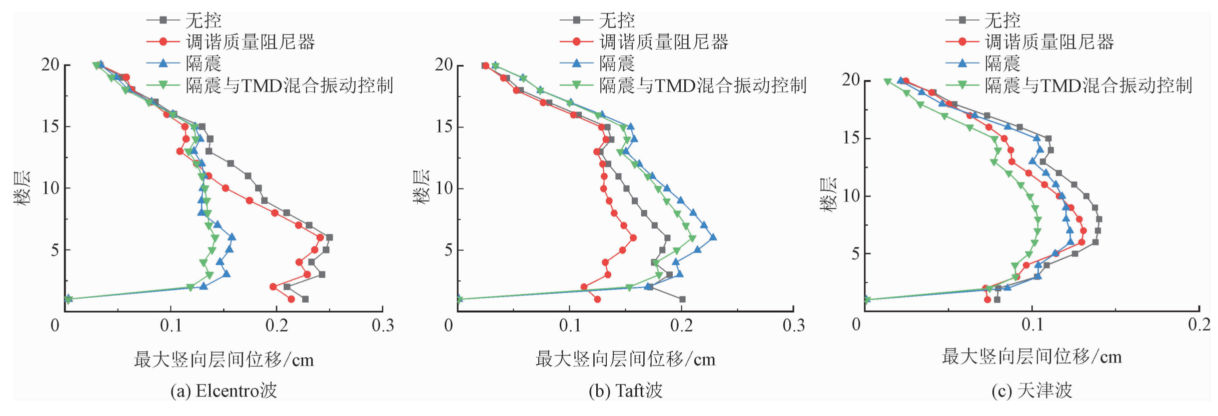


图3　3种地震波作用下结构最大竖向位移

Fig. 3　Peak vertical displacement under three waves

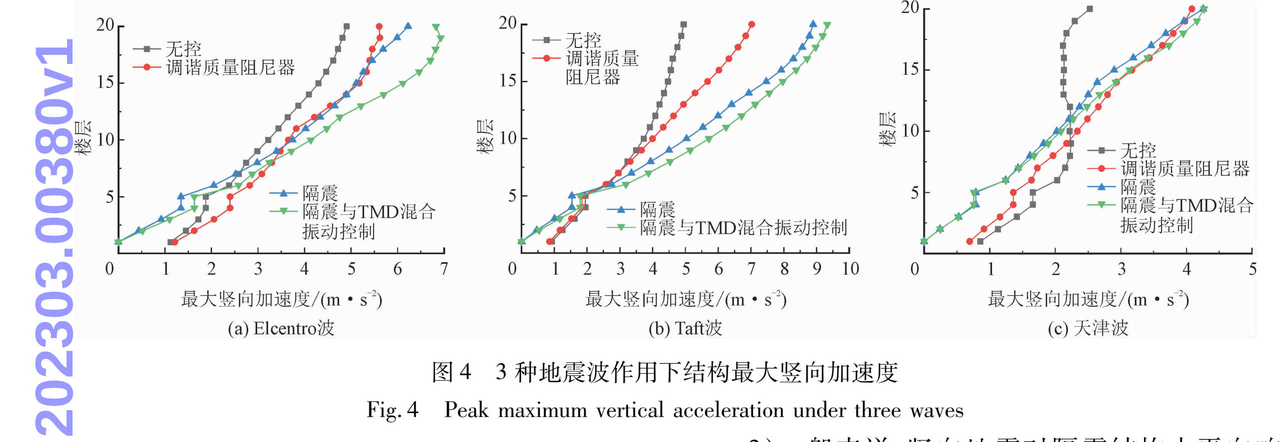


图4　3种地震波作用下结构最大竖向加速度

Fig. 4　Peak maximum vertical acceleration under three waves

3　结　论

本研究针对地震作用下高层建筑结构振动控制问题，依托20层Benchmark结构模型进行水平和竖向地震共同作用下结构动力时程分析，利用ANSYS有限元软件对隔震、TMD和隔震与TMD混合控制3种不同振动控制策略进行抗震减振性能分析。

1）L_1、L_2、L_3 这3个控制指标在无控、TMD控制、隔震及混合控制工况下，水平和竖向地震共同作用下与水平地震单独作用下的水平向响应均小于5%，即竖向地震对结构水平向位移、加速度和底部剪力影响不大。

2）在Elcentro波作用下，TMD控制时位移指标 R_1 达到了108.80%，出现了略微增大的情况，其余评价指标均小于1。加速度指标 R_2 在3种控制工况下均出现增大的情况，最大时达到无控状态的188.87%。底层轴力指标 R_3 在隔震及混合控制工况下为0.73%～2.12%，效果明显优于TMD控制的81.78%～93.82%。

3）一般来说，竖向地震对隔震结构水平向响应影响不大，但由于本研究算例中隔震层的竖向刚度远大于原结构层刚度这一特点；隔震层竖向自振周期与场地土特征周期比值不在最优控制范围内，从而导致竖向加速度有所放大。另一方面，由于TMD的竖向自振周期与结构竖向自振周期相近导致了竖向的鞭梢效应，使得地震响应尤其是加速度响应增大。

4）本研究算例对竖向地震的控制效果不佳，主要是模型中的TMD和隔震层参数采用的均为水平地震单独作用时的基本参数。对于水平和竖向地震共同作用，后续研究可以考虑使用复合隔震支座或者在TMD水平质量块上设置竖向子结构，同时对隔震层和TMD竖向参数进行优化设置，以达到对水平以及竖向地震响应的共同控制。

参考文献：

[1]　龚春玉. 竖向与水平地震作用下带PSRC空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析[D]. 重庆：重庆大学，2017.

[2]　段绍伟，陈伯望. 结构隔震技术及应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2017.

[3] 孙肇凯. 框架结构基础隔震设计关键技术及工程应用研究[D]. 济南:山东建筑大学,2019.

[4] 周福霖,张颖,谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报,2009,42(8):1-8.
ZHOU Fulin,ZHANG Ying,TAN Ping. Theoretical study on story isolation system[J]. China civil engineering journal,2009,42(8):1-8(in Chinese).

[5] 杨参天,解琳琳,李爱群,等. 适用于高层隔震结构的地震动强度指标研究[J]. 工程力学,2018,35(8):21-29.
YANG Cantian,XIE Linlin,LI Aiqun,et al. Intensity measures for seismically isolated tall buildings[J]. Engineering mechanics,2018,35(8):21-29(in Chinese).

[6] 袁胜利. 长周期地震动作用下高层隔震结构地震响应分析[D]. 武汉:华中科技大学,2018.

[7] 李春祥,刘艳霞,王肇民. 地震作用下结构的基于阻尼柔性连接 MTMD 控制[J]. 应用力学学报,2003,20(2):116-120.
LI Chunxiang, LIU Yanxia, WANG Zhaomin. Flexible jointed damping based MTMD for structures under earthquake[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2003, 20(2): 116-120 (in Chinese).

[8] 张红艳,白长青,许庆余. 多自由度复杂结构的 TMD 调谐减震控制研究[J]. 应用力学学报,2008,25(4):583-587.
ZHANG Hongyan, BAI Changqing, XU Qingyu. TMD design for seismic protection of multi-degree of freedom complex structures[J]. Chinese journal of applied mechanics,2008,25(4):583-587(in Chinese).

[9] ELIAS S, MATSAGAR V. Optimum tuned mass damper for wind and earthquake response control of high-rise building[M]. New Delhi:Springer,2014.

[10] 汪志昊,郜辉,张新中,等. 单摆式电涡流 TMD 装置优化设计与模型试验研究[J]. 振动与冲击,2018,37(9):1-7.
WANG Zhihao, GAO Hui, ZHANG Xinzhong, et al. Optimization design and model tests for a pendulum eddy-current tuned mass damper[J]. Journal of vibration and shock,2018,37(9):1-7(in Chinese).

[11] 汪权,袁加伟,王肖东,等. 地震作用下高层结构分布式多重调谐质量阻尼器振动控制研究[J]. 应用力学学报,2018,35(6):1214-1219.
WANG Quan, YUAN Jiawei, WANG Xiaodong, et al. Distributed multiple tuned mass dampers for vibration control of tall buildings under earthquakes[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018,35(6):1214-1219 (in Chinese).

[12] 张永康. 高层建筑体系竖向地震作用下的动力特性研究[D]. 西安:西北工业大学,2005.

[13] 王海东,常广乐,盛旺成. 近场水平、竖向地震共同作用下地基-基础-RC 框架结构抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(1):192-198.
WANG Haidong, CHANG Guangle, SHENG Wangcheng. Seismic performance of soil-foundation-RC frame under near-fault horizontal and vertical earthquake[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2017,37(1):192-198(in Chinese).

[14] 陈勇,简斌,龚春玉. 竖向及水平地震作用下 PSRC 空腹桁架转换结构抗震性能分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2020,42(3):64-72.
CHEN Yong,JIAN Bin,GONG Chunyu. Seismic performance analysis of frame with PSRC vierendeel truss transfer story under vertical and horizontal ground motion[J]. Journal of civil and environmental engineering,2020,42(3):64-72(in Chinese).

[15] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003.

(编辑 黄崇亚)